

## **O Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Orgânicos para Geração de Energia Térmica a partir da Biodigestão Aeróbia**

### **The reuse of organic solid waste for the generation of thermal energy from aerobic biodigestion**

**Luciana Lopes Kuramoto Moreira, arquiteta e urbanista, discente do Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.**

*kuramoto.arktetura@gmail.com*

**Fernando Pereira de Sá, bacharel em física, doutor e docente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.**

*fernando.fpsa@ifg.edu.br*

**Elisângela Cardoso de Lima Borges, bacharel em química, doutora e docente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.**

*elisangela.borges@ifg.edu.br*

**Marcos Aurélio Leandro Alves da Silva, graduando em Licenciatura em Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.**

*marcos\_aurelio.silva@hotmail.com*

### **Resumo**

Tendo em vista a indiscutível necessidade de redução da disposição de resíduos sólidos no meio ambiente e do grande potencial energético advindo do tratamento destes, o uso de rejeitos é uma opção extremamente viável para a produção de energia renovável. A partir disso, o objetivo deste trabalho é apresentar um processo de geração de energia térmica a partir de resíduos sólidos orgânicos, tendo em vista que o processo de urbanização, além de gerar uma quantidade expressiva de resíduos, também exige a potencialização do sistema energético. Para tanto, foi realizado e analisado um processo de biodigestão aeróbia a partir de resíduos sólidos orgânicos no Instituto Federal de Goiás – Câmpus Inhumas – e desenvolvido um sistema para sua conversão em energia térmica, visando não somente a geração de energia renovável mas, principalmente, o caminho para uma sociedade limpa e economicamente sustentável. As principais qualidades dos combustíveis derivados da biomassa é o elevado teor de oxigênio, que resulta em uma baixa produção de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e na ausência

de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e, com os resultados, confirmou-se a viabilidade e a eficácia desta técnica, a partir da boa qualidade do composto gerado, da obtenção de um bom poder calorífico e boa durabilidade do processo de combustão.

**Palavras-chave:** Resíduos; Biodigestão; Energia.

### ***Abstract***

*Owing to the undeniable requirement to reduce the disposition of solid waste in the environment and the great energy potential accrue from its treatment, the use of waste is an extremely viable option for the generation of renewable energy. From this, the objective of this study is to present a process of thermal energy generation from solid organic waste, considering that the urbanization process, in addition to the engender of a considerable amount of waste, also requires the improvement of the energy system. Therefore, an aerobic biodigestion process using organic solid waste was performed out and analyzed at the Federal Institute of Goiás – Inhumas Campus – and a system was developed for its conversion into thermal energy, aiming not only at the generation of renewable energy, but mainly at the path to a clean and economically sustainable society. The main qualities of fuels derived from biomass are the high oxygen content, which results in a low production of particulate compound (MP), carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (HCT) and in the absence of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and, with the effects, the availability and efficiency of this technique was confirmed, based on the good quality of the product, the achievement of a good calorific power and a good durability of the burning process.*

**Keywords:** Waste; Biodigestion; Energy.

## 1. Introdução

Ao longo dos tempos, a humanidade intensificou o processo de urbanização e o desenvolvimento industrial, sem se preocupar, porém, com o uso racional dos recursos naturais. Considerando que não se pode falar em resíduo urbano abordando apenas a fase de tratamento, os aspectos sobre a gestão socialmente integrada para os resíduos sólidos urbanos devem ser destacados. No modelo de desenvolvimento econômico não sustentável, há uma excessiva produção de resíduos, o que é claramente percebido no Brasil. Além da quantidade, há também a variedade de materiais e substâncias químicas estranhas ao ambiente. O uso de tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), com ou sem aproveitamento energético, como solução aos problemas do resíduo urbano, apesar de extremamente necessário, ainda é incipiente no Brasil (BREDA et al., 2009), o que é corroborado por Rosa et al. (2015), que ressalta o fato da grande maioria dos aterros sanitários e das estações de tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais apenas coletar e queimar o biogás gerado, sem aproveitamento do seu potencial energético, o que também é confirmado por Borges (2016).

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (IBGE, 2010), 50,8% dos resíduos sólidos dos municípios brasileiros ainda são dispostos em vazadouros a céu aberto (lixões) sendo que, provavelmente, esse número seja ainda maior, o que ratifica a precária situação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), definindo por destinação final ambientalmente adequada a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária e do Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária. Segundo a PNRS, somente os rejeitos – material restante dos processos de tratamento – devem ser dispostos em aterros sanitários. Esta disposição precisa, portanto, ser regulamentada, observando-se normas operacionais específicas a fim de se evitar danos ou riscos à saúde pública e dirimir amplamente os impactos ambientais.

A urbanização é um processo que ocorre no Brasil, paralelamente à industrialização, a partir de 1930, quando os interesses urbanos industriais se tornam importantes na política econômica, mas sem o abandono das relações antigas, alicerçadas na propriedade fundiária. Esse acelerado crescimento tem causado uma extensa degradação socioambiental (MARICATO, 2002).

Para Silva (2015), a demanda brasileira por energia cresce a cada dia em função da intensa dinamização de sua economia, fazendo com que a busca por fontes alternativas se torne indispensável. Silva e Soeiro (2014) relatam que, com a crise da energia elétrica e o plano de racionamento de 2001, chamou-se atenção para a necessidade de diversificar as fontes de energia no Brasil, tendo-se inúmeras pesquisas que apontam para a viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Tolmasquim (2003), apud Moura (2014), afirma que, considerando as tecnologias atualmente disponíveis, é possível reduzir as emissões de metano provenientes de aterros sanitários em até 50%, o que representaria um total de 10 a 25 milhões de toneladas por ano deixando de ser emitidas. O lançamento de dejetos na natureza, sem tratamento prévio, pode causar desequilíbrios ambientais,

proliferação de vetores de doenças e o aumento de doenças vinculadas à água e ao solo (SHULTZ, 2007). Diversos países no mundo já aproveitam o potencial energético do metano gerado em processos anaeróbios como uma maneira de tornar os sistemas de tratamento sustentáveis ou até mesmo autossuficientes energeticamente, visando não somente a geração de energia, mas também uma ideal disposição e utilização dos resíduos sólidos gerados, porém, a digestão aeróbia, técnica a ser abordada neste estudo, ainda é pouco citada nos estudos divulgados. Nos Estados Unidos, mais de 1000 estações de tratamento aproveitam o potencial energético, sendo que 74 chegam a gerar mais energia do que consomem, vendendo-a para o sistema elétrico (BILOTTA; ROSS, 2016).

Segundo Pecora (2006), o aproveitamento energético destes resíduos, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, também traz benefícios para a sociedade, uma vez que promove a utilização ou reaproveitamento de recursos “descartáveis” e/ ou de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia de combustíveis fósseis, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia, aumentando sua oferta; possibilita a geração local de empregos; reduz os odores e as toxinas do ar; diminui a emissão de poluentes pela substituição dos combustíveis fósseis; colabora com a viabilidade econômica dos aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes; otimiza a utilização local de recursos; e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas.

É relevante e imprescindível salientar a escassez de referências de estudos similares ao em desenvolvimento. A princípio, a digestão aeróbia não é executada da forma proposta e nem mesmo para os fins propostos neste estudo. Há semelhanças entre esta e o processo de compostagem mecanizada, mas este, por sua vez, não é designado para a produção de produtos utilizados na geração de energia, e sim para a produção final de biofertilizantes. Ainda assim, utilizaremos referências de publicações sobre compostagem para embasamento nos parâmetros e técnicas mais eficazes para o procedimento, uma vez identificada a similaridade dos processos.

Após o processo de biodigestão aeróbia, o produto foi compactado para criar pellets, que foram utilizados para a geração de energia térmica. Têm-se, mundialmente, a utilização de pellets visando este fim, mas os pellets, habitualmente, são compostos de resíduos sólidos advindos de restos de podas ou florestais, o que facilita não só o processo de peletização mas, também, o aumento do poder calorífico do produto, o que justifica a sua ampla utilização já consolidada no mercado europeu.

Assim como o processo de digestão aeróbia, não foram identificadas referências bibliográficas científicas sobre o processo de peletização de resíduos sólidos orgânicos, e também sobre a geração de energia térmica a partir da queima dos pellets.

Portanto, foram utilizadas bibliografias sobre o processo de geração de energia a partir de resíduos sólidos, sobre os processos técnicos abordados no estudo, individualmente, e sobre a forma como são comumente aplicados, tendo-se em vista que, ainda que não haja estudos neste formato, há bastante similaridade entre os processos propostos.

Buscou-se, com esta pesquisa, confirmar as possibilidades e a viabilidade de implantar-se um sistema de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos, elucidando os maiores desafios atuais para a implantação e consolidação de sistemas de reaproveitamento

de resíduos no Brasil e para a redução destes, buscando confirmar que é possível haver uma “simbiose” entre o processo de urbanização, a sustentabilidade e a eficiência energética.

## 2. Metodologia

A metodologia foi dividida em 3 etapas, que serão descritas detalhadamente adiante:

1. Processo de caracterização dos compostos, realização prática da biodigestão aeróbia, confecção e queima dos pellets;
2. Processo de monitoramento e análise dos dados (análise multivariada) durante e após os processos 1 e 3, sendo componentes dos processos dados como temperatura, umidade, pH, gases presentes, nível de compactação e durabilidade dos pellets, quantidade de aditivos, poder calorífico e quantidade de cinzas gerada.
3. Processo de queima dos pellets para conversão de energia térmica, com análise indireta do poder calorífico.

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Energia e Meio Ambiente do Instituto Federal de Ciência Tecnologia de Goiás, Câmpus Inhumas, utilizando os equipamentos e reagentes já existentes no mesmo. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta das atividades básicas realizadas para execução deste projeto de pesquisa.

A matéria prima utilizada no estudo foi coletada no próprio Câmpus Inhumas, utilizando as lixeiras do pátio superior e inferior, com ajuda dos alunos que separaram os resíduos orgânicos dos recicláveis nos próprios locais de descarte (Figura 1).



**Figura 1: Lixeiras utilizadas na coleta de amostras para o projeto.**  
**Fonte: Própria.**

Após a coleta dos resíduos, foi feita a seleção do material que poderia ser utilizado no processo de biodigestão, utilizando biodigestor metálico (Figura 2). Foram escolhidos pedaços pequenos, por serem mais facilmente decompostos pelo processo aeróbico e, além disso, realizou-se a submissão dos mesmos a um processo de trituração e à adição de 20% de serragem. No final do processo de biodigestão, que leva entre 10 e 14 dias, foi retirado o composto e eliminada toda sua umidade. O processo de desidratação leva até 3 dias, sendo este necessário para facilitar a queima dos pellets.





**Figura 2: Biodigestor aeróbio.**  
**Fonte: Própria.**

Logo após esta etapa, foram acrescentados outros resíduos, tais como gordura e sebo animal, para maior consistência e aumento do poder de combustão do composto biodigerido e, em seguida, realizada a compactação para fabricação dos pellets, realizada com o uso de duas seringas de 10 mL, para prensa (Figura 3). Após este processo de compactação, os pellets foram deixados em repouso, até atingir a textura ideal para o manuseio.



**Figura 3: Compactação do composto, juntamente com os aditivos propostos, para formação dos pellets.**  
**Fonte: Própria.**

A segunda parte da pesquisa foi composta pelo monitoramento, através de equipamentos específicos para cada tipo de dados, sendo estes: gases produzidos, massa do composto, pH, temperatura e umidade, e avaliação por análises estatísticas, para medição dos dados, possibilitando sua validação e possível otimização do processo, no decorrer do estudo.

Baseados na literatura de Barros Neto (2010) que fundamentou a análise estatística (análise multivariada) utilizada na pesquisa, definiu-se os parâmetros relevantes atuantes na

boa qualidade do processo de biodigestão aeróbia dos resíduos sólidos orgânicos; identificar e mensurar as variáveis que interferem diretamente no processo de queima máxima dos resíduos peletizados e no poder calorífico da queima; demonstrar que tais resíduos podem ser minimizados e/ ou totalmente eliminados através deste.

Os dados coletados, a partir dos ensaios realizados, juntamente com análise da tabela de ordem padrão, possibilitaram a análise e identificação da melhor combinação de variáveis, a fim de se obter pellets uniformes, com queima próxima à máxima e com bom poder calorífico.

Após a finalização do processo de confecção e queima dos pellets, a etapa seguinte foi medir o poder calorífico.

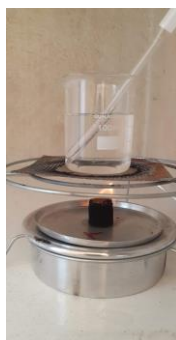
O estudo do poder calorífico dos pellets desenvolvidos foi realizado a partir de um sistema simples de aquecimento de água, tendo em vista a discussão dos valores obtidos.

A capacidade calorífica dos pellets confeccionados foi testada através de ensaios de combustão simples. O pellet foi queimado e usado para aquecer 75 mL de água com o objetivo de se determinar a variação de temperatura da água após toda a queima do pellet. Após o teste e com os dados obtidos foi possível determinar o poder calorífico do material, utilizando a equação da termodinâmica (equação (1)):

$$Q = m.c.\Delta t \quad (1)$$

Sendo: Q - quantidade de calor (cal); m - massa (g); c - calor específico (cal/g °C);  $\Delta t$  - variação de temperatura (°C).

O sistema utilizado para a identificação da variação de temperatura teve como característica o uso de: um suporte, uma tela de amianto, um béquer, um termômetro e um apoio para que o pellet ficasse o mais próximo do fundo da vidraria, minimizando perdas de calor durante o processo (Figura 4).



**Figura 4: Montagem do sistema para a combustão simples.**  
**Fonte: Própria.**

Os pellets foram compactados com um produto final de umidade de 41,67%. A Figura 5 ilustra alguns dos pellets que fizeram parte da análise.



**Figura 5: Pellets utilizados no cálculo do poder calorífico.**  
**Fonte: Própria.**

### **3. Resultados**

#### **3.1 Caracterização do composto biodigerido**

O composto advindo de resíduos sólidos urbanos orgânicos atingiu o resultado esperado (Figura 6), chegando ao final do processo com aspecto escurecido, levemente úmido, e ausência de odor, o que configura ausência de elementos patogênicos como os que podem ser encontrados no composto em sua forma inicial, após o início da ação dos microrganismos.



**Figura 6: Composto biodigerido.**  
**Fonte: Própria.**



### 3.2 Análise Multivariada

O planejamento fatorial teve como embasamento o questionamento: “Qual a combinação mais adequada para melhor combustão dos pellets (menor quantidade de cinza residual)?”.

Os resultados obtidos no cálculo do efeito principal em relação às variáveis estudadas (umidade, quantidade de sebo e de gordura animal) estão apresentados na Tabela 1. Os valores apresentados pelo efeito principal para cada uma das variáveis ilustram claramente a influência das três variáveis na quantidade máxima de combustão e, evidentemente, essa influência ocorre de modo diferente, conforme os sinais (positivo ou negativo).

Fatores	Nível Alto (+)	Nível baixo (-)
Umidade	52	40
Sebo	3	1
Gordura	3	1

**Tabela 1: Definição dos níveis dos fatores para um planejamento fatorial dos experimentos.**  
Fonte: própria

Para a faixa de valores avaliada, a quantidade de gordura animal foi a variável que mais interferiu no processo de combustão. É importante ressaltar, ainda, que esta influência é negativa (-6,207), pois o valor da variável resposta é negativo, isto significa que aumentando a quantidade de gordura animal da amostra haverá uma diminuição da combustão.

A concentração de sebo foi a segunda variável que mais influenciou no processo de combustão. Neste caso, como o valor de resposta é negativo, significa que o aumento da quantidade desta variável provocará uma diminuição da combustão máxima. A variável que menos interferiu no processo foi a umidade (Tabela 2).

Variável	Efeito Q (valor absoluto)	Influência no processo (%)
Umidade	0,594	6,08
Sebo	2,971	30,4
Gordura	6,207	63,52
$\Sigma$	9,772	100

**Tabela 2: Valores absolutos dos principais efeitos na quantidade máxima de combustão e sua influência no processo, baseado nas respostas de queima com valor da amostra total.**  
Fonte: Própria.

### 3.3 Poder calorífico

Uma das características dos combustíveis derivados da biomassa é o elevado teor de oxigênio, que resulta em uma baixa produção de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT) e na ausência de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) (MATURANA, 2011). Logo, a biodigestão aeróbia é totalmente viável para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, principalmente se o foco estiver na compactação de pellets para a produção de energia.

Levando-se em consideração a massa da água fixa de 75 g e a temperatura inicial da mesma de 29 °C, foi possível calcular a quantidade de calor liberadas pela variação da temperatura. Ressaltando que o calor específico da água é 1 cal/g°C, foi possível obter os resultados expressos na Tabela 3.

Experimento	Massa do pellet (g)	Temperatura Inicial t <sub>1</sub> (°C)	Temperatura Final t <sub>2</sub> (°C)	$\Delta T (t_1 - t_2)$	Massa (g)	Quantidade de calor (cal)
1	3,01	29	56	27	75	2025
2	3,01	29	57	28	75	2100
3	3	29	57	28	75	2100
4	3	29	56	27	75	2025
5	3	29	56	27	75	2025
6	3	29	56	27	75	2025

**Tabela 3: Resultado de teste de poder calorífico pelo aquecimento da água.**  
Fonte: Própria.

Quando enriquecido com algum tipo de ligante (gordura/ sebo animal) e exposto à chama do maçarico, o composto manteve a chama por um tempo de 8 a 12 minutos. Assim, como é possível visualizar na Figura 7, a capacidade calorífica da integração entre a matéria decomposta e o ligante foi mais potente que a matéria pura, podendo apresentar grande eficiência na geração de energia térmica.



**Figura 7: Pellet após ser submetido a uma fonte de calor.**  
Fonte: Própria

#### 4. Conclusões

A regularização da destinação final de resíduos é uma imposição legal, sob pena de aplicações cabíveis dentro da legislação ambiental. Somado a isso, existe a necessidade de planejamento da substituição de unidades para destinação adequada ao fim da vida útil dos resíduos sólidos. É possível observar que o desenvolvimento desse trabalho contribui não só para discussões acerca do descarte indevido dos RSU mas, também, para o remanejamento adequado do material orgânico dispostos nas lixeiras dos ambientes escolares. Além disso, é primordial a ênfase no processo de biodigestão aeróbia que possui grande eficiência na produção de biomassa, que quando enriquecida com gordura animal e compactada em forma de pellets, possibilita a produção de uma fonte energética renovável.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFG e CNPq, pelo apoio financeiro e de infraestrutura.

#### Referências

BARROS NETO, B. **Como fazer experimentos [recurso eletrônico]: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria/** Benício de Barros Neto, Ieda Spacino Scarminio, Roy Edward Bruns. 4ª edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2010.

BILOTTA, P. ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 21. n. 2. p. 275 - 282. Rio de Janeiro, 2016.

BORGES, H. D. **Avaliação da viabilidade de recuperação e uso de biogás em uma estação de tratamento de esgoto.** Dissertação para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Brasília, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)>. Acesso em: setembro, 2018.

BREDA, C. C. TRABALLI, R. C. MAKIYA, I. K. **Bases ecossustentáveis para o desenvolvimento urbano: potencial energético a partir de lodo de esgoto e resíduos sólidos.** III Encontro de Sustentabilidade em Projeto do Vale do Itajaí. Itajaí, 2009.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Indicadores sociais municipais – Uma análise dos resultados do universo do Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro, 2011.



MARICATO, E. **As idéias fora do lugar e o lugar fora das idéias.** In: ARANTES, O. VAINER, C. MARICATO, E. A cidade do pensamento único: desmanchando consensos. Editora Voze. Petrópolis, 2002.

MATURANA, A.Y. Estudo da combustão direta da glicerina bruta e loira como alternativa de aproveitamento energético sustentável. **Ph.D.** Tese da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MOURA, J. S. **Avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de esgoto em uma simulação experimental de aterro sanitário.** Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2014.

PECORA, VANESSA. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso.** Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Energia (PIPGE), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SCHULTZ, Guilherme. **Boas Práticas Ambientais na Suinocultura.** Porto Alegre: SEBRAE/ RS, 2007.

SILVA, H. J. Produção de Biofertilizantes e Aproveitamento Energético do Biogás Proveniente da Digestão Anaeróbia do Lodo Produzido em ETE: Uma Avaliação do Potencial da Cidade de Cristina (MG). **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v. 4, p. 87-110. Itajubá, 2015.

SILVA, R. J. SOEIRO, E. C. **Viabilidade da utilização do biogás como fonte alternativa de energia.** Revista eletrônica de petróleo e gás. Ano 2. n. 1. 2014. Disponível em: < <https://repositorio.unp.br/index.php/runpetro>>. Acesso em: junho, 2018.